

福井大学

工学部 研究報告

第23巻 第2号

昭和50年9月

He-Ne レーザーの電流変調特性

山 岸 万 千 雄^{*}・北 島 巖^{*}・岩 沢 宏^{*}

Modulation of Discharge Current in a He-Ne Laser

Machio YAMAGISHI, Iwao KITAZIMA, Hiroshi IWASAWA

(Received Apr. 15, 1975)

In order to study the characteristic of modulation noise and the mechanism of oscillation in a gas discharge laser, the current has been modulated in square wave. In the present experiment, the discharge current of a 6328Å He-Ne laser is periodically under square wave modulation of 10 percent. The frequency dependence of discharge current and laser emission is also observed. The resonance phenomena appear near 30 kHz and the critical frequency appears near 100 kHz. The response time of laser emission is found to be 30 μ sec. As modulation frequency is increased, pulse waveform of laser light does not form a square wave. It is found that the component of high frequency noise, or quantum noise of 300 MHz, is superposed on modulation waveform of laser light.

1. 序 論

気体レーザーの雑音には放電電流に依存する変調雑音、音光共振器の機械的振動によるマイクロフォニック雑音、多モード競合による過剰光子雑音、熱雑音およびレーザー準位間の遷移の統計的ゆらぎに基づく量子雑音など各種のものがある。この中で変調雑音は普通の直流放電型の He-Ne レーザーの雑音の中で最も大きいものである。

従来、気体レーザーの変調雑音の臨界周波数や励起機構を考察するために放電電流の変調実験がなされてきている。本郷氏ら¹⁾は6328Åで発振しているHe-Ne レーザーの放電電流を繰り返し矩形波変調して臨界周

波数を求めている。また、田幸氏ら²⁾は高周波で He-Ne レーザー (1.15 μ m) をパルス励起して、そのときのレーザー・パルス波形から励起終了後、パルスが enhance されることを観測している。最近、上原・藤井の両氏³⁾は放電電流を繰り返し矩形波変調することにより各準位の自然遷移率を求めている。

本実験は 6328Å で発振している He-Ne レーザーの放電電流を強制的に繰り返し矩形波変調をし、変調雑音の臨界周波数を求め発振機構の考察を行うことを目的としている。レーザー光の変調波形の周波数依存性から He2'S 準安定状態の働きの重要性を測定するとともに Ne3s 状態 Ne2p 状態などレーザー発振に関係している各状態の働きも調べ考察を行う。

^{*}電子工学科

2. 実験装置

実験装置の概略を Fig.1 に示す。電流変調の実験装置は He-Ne レーザー管、変調回路、パルス発生器、シンクロスコープ、光減衰器などで構成されている。He-Ne レーザーは発振波長 6328\AA 、内部鏡型であり、内径 $2\text{mm}\phi$ 、有効放電長 10cm 、光共振器長 30cm のものである。変調回路はトランジスタを2段縦接続したエミッタ入力型であり、アースとエミッタの間に挿入した 220Ω の抵抗で放電電流の変調波形を検出している。パルス発生器は 0.1Hz から 1MHz まで変化させることができ、また交流信号に直流分を重ね合わせることも可能である。光検知器には光電子増倍管 MS-9S と光電管 PV-24 を用い、レーザー管から充分離して受光し、逆二乗則で減衰する自然放出光を無視できるようにした。また、測光の変調測定には移動縞の影響の少ない陽極側に MS-9S を設置してある。光減衰器には 1% 透過フィルターと 10% 透過フィルターを用いた。

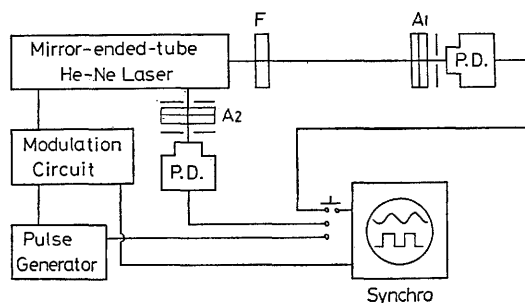


Fig. 1 Experimental setup for the discharge current modulation.

変調回路をレーザー管の陰極とアースの間に挿入し放電電流を強制的に繰り返して矩形波変調をする。そのときのレーザー光と測光の応答を光検知器で検出し放電電流の変調波形とともにシンクロスコープで測定している。

3. 実験および結果

3.1 He-Ne レーザーの諸特性

レーザー光の出力強度、放電電流中に存在している振動的ゆらぎの振幅、レーザー管の陰極—陽極間電圧などの放電電流依存性を調べた。

放電電流の値を変化させ、そのときのレーザー光の出力強度を光電管 PV-24 で検知し、シンクロスコープで観測した。その結果を Fig.2 に示す。レーザー

光の出力強度は放電電流増大とともに増加していき、放電電流 15mA 弱のところで最大値を示し、それ以上の値になると減少していく。また、出力強度の変化は上に凸形の放物線に近似される。

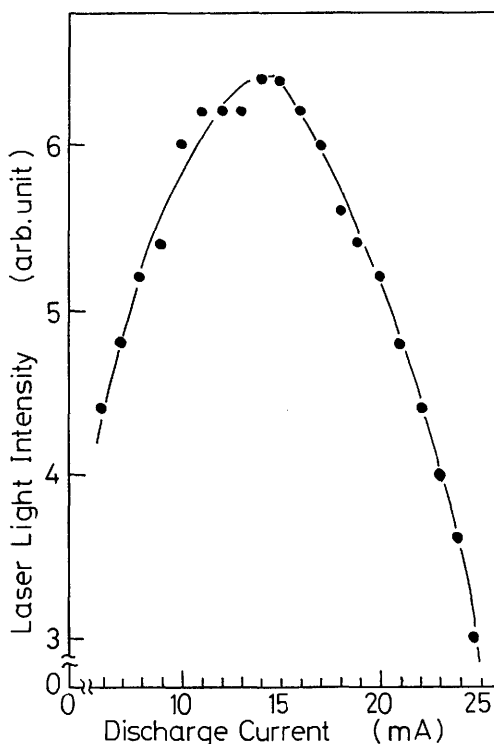


Fig. 2 He-Ne laser light intensity as a function of discharge current.

放電電流を増加させていくと放電電流中に振動的ゆらぎの生じる現象がある。そのゆらぎをレーザー管の陰極とアースの間に挿入した 500Ω の抵抗で検出しシンクロスコープで観測した。その結果を Fig.3 に示す。放電電流 12mA までは振動的ゆらぎが存在していないが、 14mA 近傍から発生し始める。 20mA 近傍でその振幅が急激に増加しており、 22mA 以上で安定して発生しているのが観測された。

放電電流 (I_p) を増加させていき、そのときの陰極—陽極間電圧 (V_p) を入力インピーダンス $1\text{M}\Omega$ の真空管電圧計で測定し、その結果を Fig.4 に示す。 I_p の増加とともに急速に V_p は減少していくが、高電流になるとその減少の仕方は非常に緩慢になっている。特に、高電流領域では I_p の変化に関係なく V_p の値が変化せず一定値を保っている部分が生じてくる。

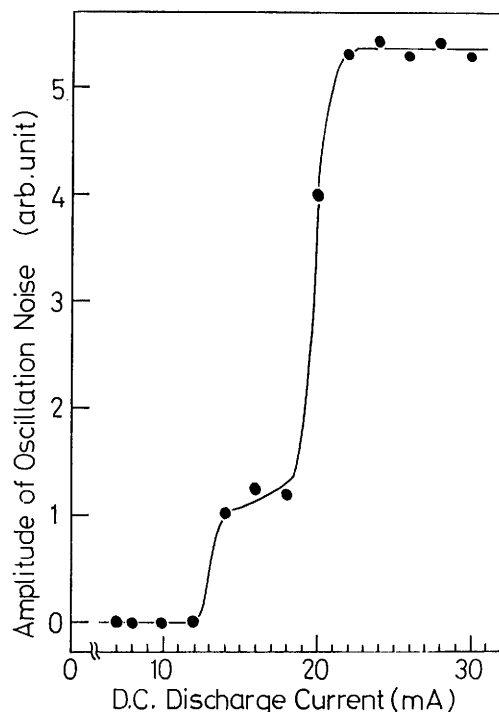


Fig. 3 Amplitude of oscillation noise as a function of discharge current.

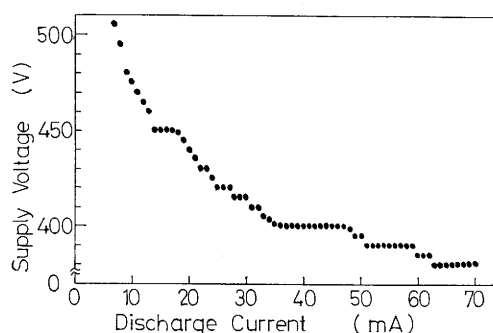


Fig. 4 Supply voltage as a function of discharge current.

3.2 放電電流の変調波形

変調回路で放電電流を繰り返し矩形波変調をし、そのときのパルス発生器からの出力と放電電流の変調波形とをデュアル・ビーム・シンクロスコープで観測し変調波形の周波数依存性を測定した。Fig. 5には直流放電電流 6mA のときの変調周波数 500Hz から 700 KHz まで 6 種類の放電電流の変調波形を示してある。上のトレースが放電電流の変調波形であり、下の

トレースはパルス発生器からの出力波形である。変調周波数 500Hz では放電電流の変調波形は入力波形とほぼ一致している。変調周波数 10KHz になると変調波形の立ち上がりにくずれが生じているがほぼ矩形波に追従している。この変調周波数までの放電電流の変動分は 0.77mA である。変調周波数 90KHz で変調波形の立ち上がりにオーバー・シュートが表われ矩形波らのくずれが目立ってくる。このオーバー・シュートの部分は指数関数的に上昇している。変調周波数 400 KHz 以上において、この指数関数状の部分が成長していくのが見られ、700KHz では三角形状になっている。これらのことから、矩形波で電流変調を行うには 90KHz が限界と考えられる。放電電流の変調波形の振幅の周波数依存性を示したのが Fig. 6 である、直流放電電流は 6mA と 14mA をとってある。放電電流 6mA のときは変調周波数 6KHz まで、また、14mA のときは 7KHz まで平坦部分を構成しているが、それ以上の変調周波数では単調に減少していく。

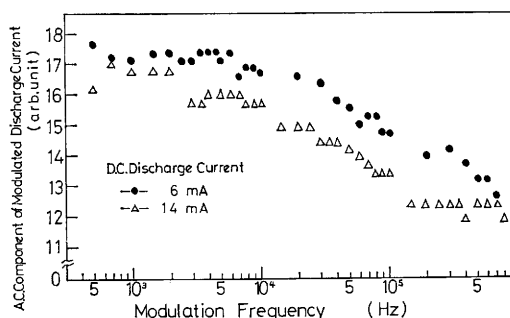
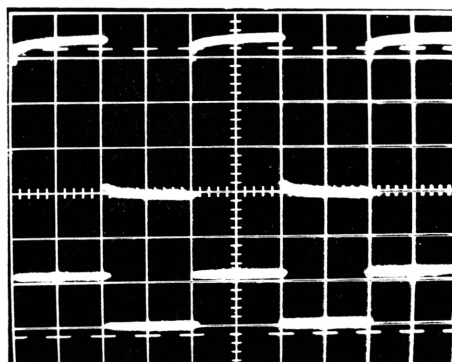


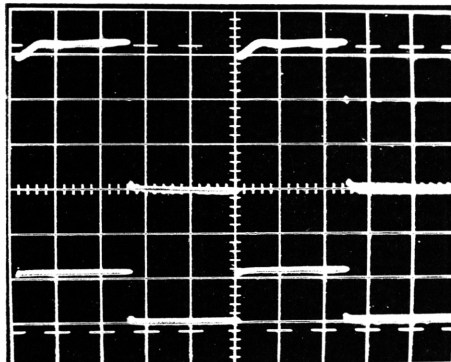
Fig. 6 A.C. component of modulated discharge current versus modulation frequency.

3.3 レーザー光と測光の変調特性

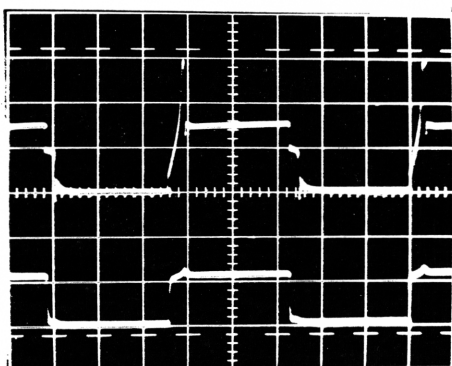
変調回路で放電電流を繰り返し矩形波変調をして、そのときのレーザー光と測光の応答を光電子増倍管 MS-9S で検出し放電電流の変調波形とともにデュアル・ビーム・シンクロスコープで観測した。ここで、直流放電電流は 6mA であり放電電流の変動分は 0.77mA である。その測定結果を Fig. 7 に示す。図において (a) から (d) まではレーザー光の変調特性を示している。上のトレースはレーザー光の変調波形を示し、下のトレースは放電電流の変調波形を示している。(e) から (h) までは測光の変調特性を示している。上のトレースは測光の変調波形を示し、下のトレースは放電電流の変調波形を示している。変調周波



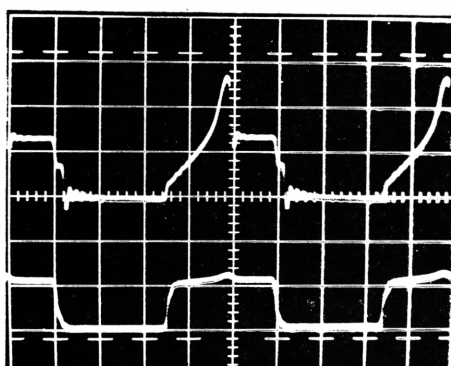
(a)



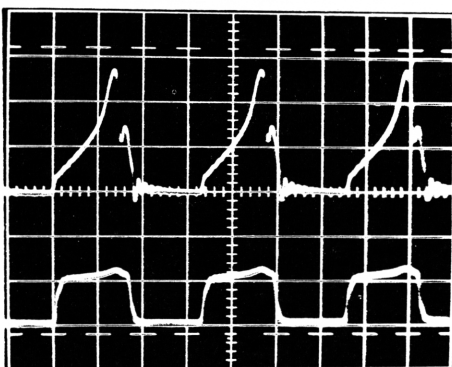
(b)



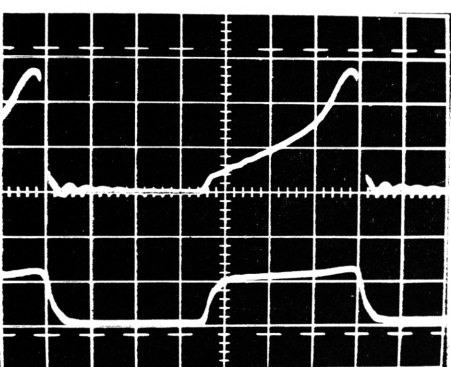
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 5 Waveform of modulated discharge current for modulation frequency with constant modulation input power.

(a) 500Hz, 0.5ms/div (b) 10kHz, 20 μ s/div (c) 90kHz, 2 μ s/div

(d) 400kHz, 0.5 μ s/div (e) 600kHz, 0.5 μ s/div (f) 700kHz, 0.2 μ s/div

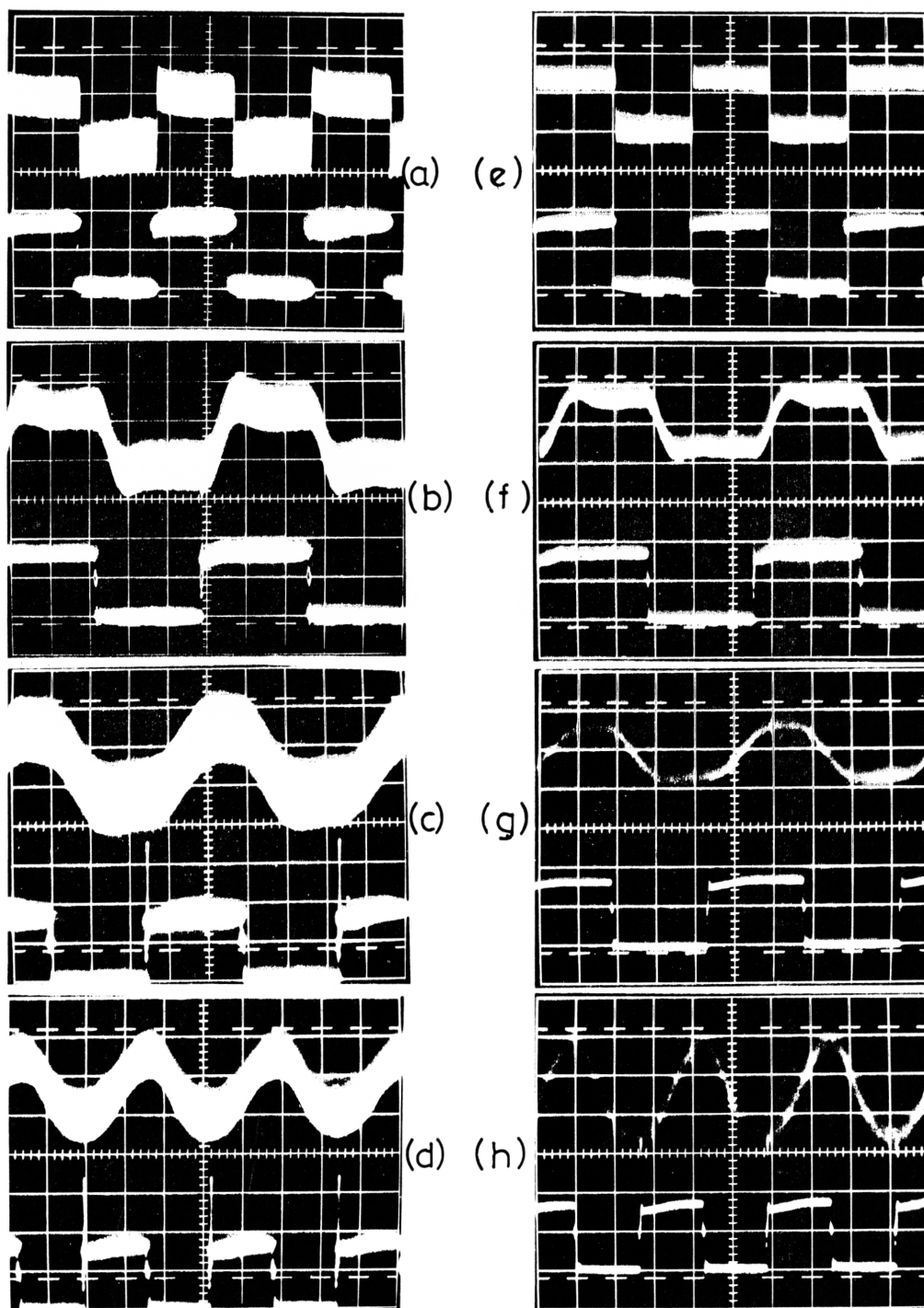


Fig. 7 Waveform of modulated He-Ne laser light v.s. modulation frequency with constant A.C. component of modulated discharge current,

(a) (e) 500Hz, 0.5ms/div, (b) (f) 9kHz, 20 μ s/div,
 (c) (g) 20kHz, 10 μ s/div, (d) (h) 30kHz, 10 μ s/div,

数は500Hz, 9KHz, 20KHz, 30KHzの4種類を掲げている。変調周波数の増大とともにレーザー光, 測光とも変調波形のくずれが顕著となってくる。変調周波数 500Hz のときレーザー光の変調波形は変調が加わったときに若干のはね上がりが見られる。それに対し測光の変調波形は入力波形に追随している。よって, このはね上がりはレーザー光特有のものである。変調周波数 9KHz になるとレーザー光, 測光とも変調波形にくずれが表われている。双方とも変調波形の立ち上がりにオーバー・シュートが表われ定常状態になるまでに約 30 μ sec かかっている。さらに励起が終了したのち約 30 μ sec の間, 変調成分が残存している。変調周波数 20KHz でレーザー光, 測光の変調波形とも矩形波からのくずれが顕著に表われている。また, 定常状態の部分はほとんど見あたらない。変調周波数 30 KHz では 矩形波変調終了後次の変調が行われるまでレーザー光の変調成分が残存している。変調周波数 9KHz から 30KHz までレーザー光と測光の変調波形はほとんど相似形である。さらに, レーザー光の変調波形には光電子増倍管のショット・ノイズ以外の量子雑音と思われる高周波成分が存在している⁴⁾。これは測光の変調波形と比較するとさらに明確である。

レーザー光と測光の変調振幅の周波数依存性を 500 Hz から 100KHz にわたって測定し Fig.8 と Fig.9 にその結果を示してある。Fig.8 には放電電流 6mA, 8mA, 14mA の3種類をパラメーターとして選んでいる。Fig.3 から前二者は振動的ゆらぎの生じていない領域, 後者は不安定に発生している領域に相当している。放電電流 6mA のときには変調周波数 2KHz

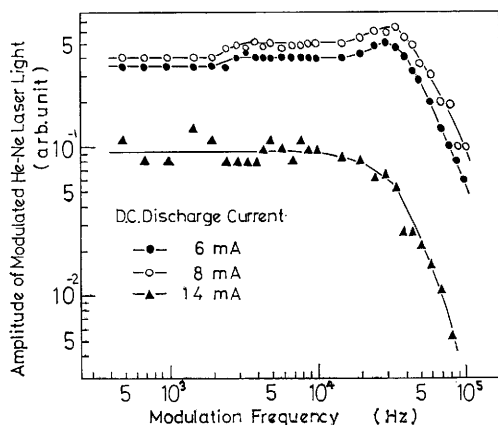


Fig. 8 Amplitude of modulated He-Ne laser light versus modulation frequency.

にかけて, 放電電流 8mA のときには 2KHz から 4KHz にかけて変調振幅が若干上昇している。その前後の変調周波数領域では一定値を示している。また, 放電電流 6mA のときには変調周波数 30KHz のところに放電電流 8mA のときには 35KHz のところに共振現象が表われている。それ以上の変調周波数になると変調振幅は急激に減少していく。放電電流 14mA のときには 6mA, 8mA のときと異なり変調周波数 2KHz から 4KHz における変調振幅の若干の上昇, 変調周波数 30KHz 近傍における共振現象は表われていない。また, 変調振幅は前二者に比較し非常に小さい。Fig.9 にはパラメーターとして直流放電電流 6mA と 14mA をとっている。変調周波数が約 20 KHz までは放電電流 14mA のときの変調振幅の方が 6mA のときのものよりも大きい。放電電流 6mA のときには変調周波数 25KHz のところに共振現象があらわれ, 放電電流 14mA のときには変調周波数 10 KHz 近傍に平坦なピークがみられる。これはレーザー光の変調特性と異なるところである。

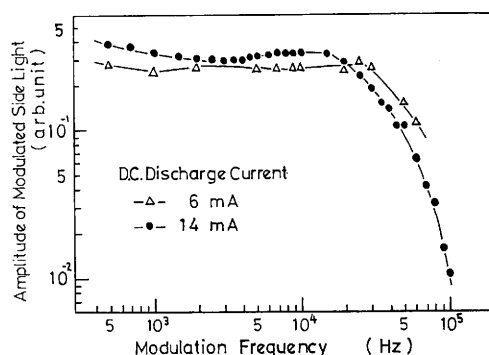


Fig. 9 Amplitude of modulated side light versus modulation frequency.

3.4 レーザー光変調振幅の電流変調度依存性

変調周波数を 100Hz に固定し, パラメーターを直流放電電流によって電流変調度を变化させることによりレーザー光の変調振幅を測定した。この振幅は光電管 PV-24 で検出した。また, 各直流放電電流において最大の変調がかかるようにしたとき, そのようにしなかったときの双方について行った。前者を“整合”, 後者を“不整合”と呼ぶ。その測定結果を Fig.10 から Fig.13 にかけて示す。Fig.10 と Fig.11 からレーザー光の変調振幅は放電電流の変調度に比例している。また, 直流放電電流の増大とともにその直線の

傾きは若干ずつ急になっていくが変調振幅は急速に減

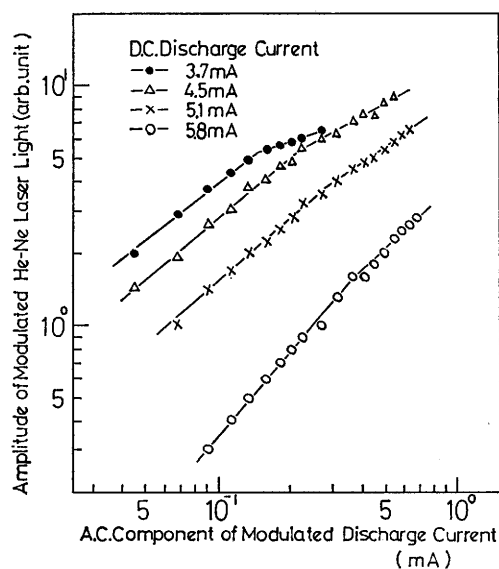


Fig.10 Amplitude of modulated He-Ne laser light as a function of A.C. component of modulated discharge current with unmatched condition.

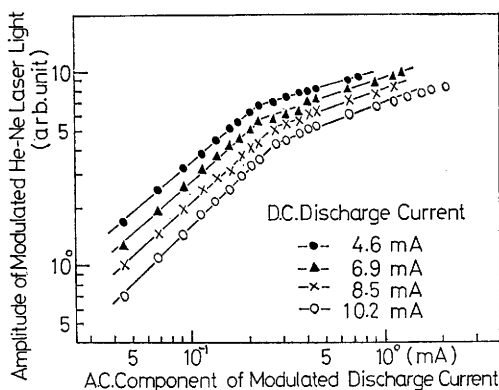


Fig.11 Amplitude of modulated He-Ne laser light as a function of A.C. component of modulated discharge current with matched condition.

少していく。その減少の仕方は Fig.12 と Fig.13 に示されている。不整合のときは直流放電電流増大とともに線形的に減少しているのに対し整合をとったときには指数関数的に減少している。Fig.10 から直流放電電流 3.7mA のとき放電電流の変動量が 0.27mA を超えると発振は停止した。

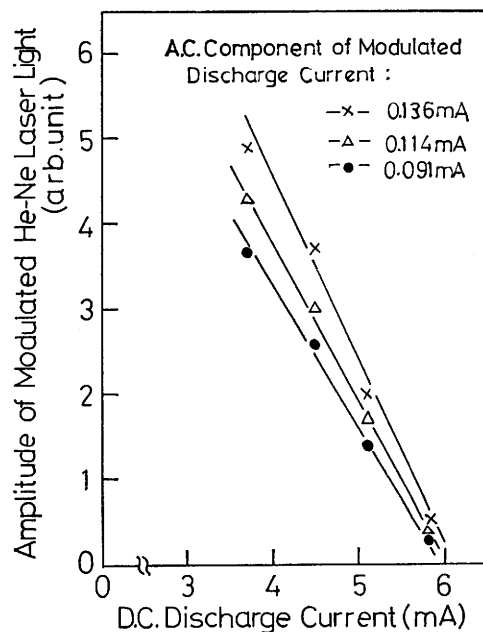


Fig.12 Amplitude of modulated He-Ne laser light as a function of D.C. discharge current with unmatched condition.

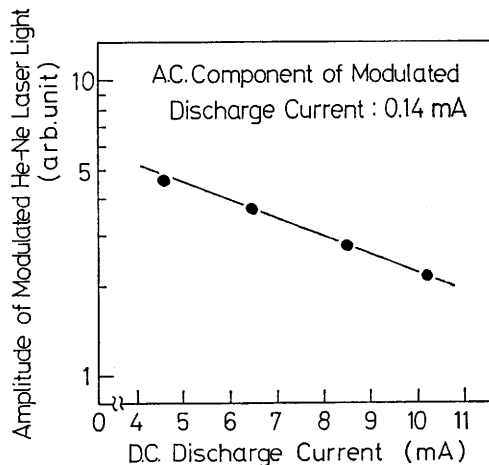


Fig.13 Amplitude of modulated He-Ne laser light as a function of D.C. discharge current with matched condition.

4. 検討・考察

4.1 レーザー光の放電電流依存性

Fig.2 から Fig.4 を通して He-Ne レーザーのいくつかの性質を調べた。これらの結果について若干の

考察を加える。

Fig.2 については、放電電流を増加させると He2¹S 準安定状態への励起が強くなり Ne3s 状態へのエネルギー移乗が多くなる。そのために Ne3s 状態と Ne2p 状態間の反転分布度が強くなりレーザー光の出力強度が増大していく。しかし、さらに放電電流を増加させていくとより高い準安定状態へ励起され He2¹S 準安定状態の密度が小さくなる。同時に、Ne2p 状態の密度が高まり、結局、Ne3s 状態と Ne2p 状態間の反転分布強度が小さくなり出力強度が減少していくことになる。また、rate equation を解くことによりレーザー光の出力強度の放電電流依存性を求めることができる³⁾。

Fig.3 に示されている現象は放電電流を増加させていくと放電電流中に振動的ゆらぎが発生することを示している。これは陰極付近に生じた振動がプラズマ内の電界からエネルギーを受け取り成長しながら陽極へ伝播していく⁵⁾ ので移動縞発生による雑音と考えられる。

Fig.4 には I_p の変化に関係なく V_p が一定値を保っている部分があるがこれはレーザー管のインピーダンスやインダクタンスが影響しているものと考えられる。

He-Ne レーザーの変調雑音の考察には発振機構をも含めて考えていかなければならない。

4.2 変調雑音特性

a) Fig.8 から変調振幅の最大値の1/10まで減少したときの変調周波数を臨界周波数とするとその値は約 100KHz となる。それ以上の周波数になると変調雑音の影響はほとんどないものと考えられる。

b) 変調周波数 20KHz までの変調振幅はほぼ一定値を保っている。このことは Fig.8 に示されている。この理由は rate equation を解くことによって理解される。

レーザー光の交流分 \tilde{w} と放電電流の交流分 \tilde{i} との間には次の関係がある³⁾。

$$\tilde{w} = \frac{P_0}{S_{21}} \cdot \frac{k}{(j\omega + r)(j\omega + S_e)} \left\{ \frac{S_{21} - S_{32}}{S_{19}} \cdot \frac{j\omega + \frac{S_{21}S_{19} - S_{32}S_{19}(ai_0 + 1)}{S_{21} - S_{32}}}{1 + j\omega(1/S_{19} + 1/S_{43}) - \omega^2/S_{19}S_{43}} - aS_{32}i_0 \right\} \cdot \tilde{i} \quad (1)$$

このように \tilde{i} の振幅が一定であれば \tilde{w} も一定を保つことがわかる。

ここで、 P_0 ; He2¹S 準安定状態への励起確率と He

基底状態の密度との積、 S_{ij} : 準位 i から準位 j への自然遷移率、 r : 光共振器の半値幅、 i_0 : 直流放電電流、 k : 自由電子の直流分と直流放電電流との比例定数、 S_e : 定数、 $a = 24 (S_{21}/S_{32} - 1)$

c) 放電電流を増加させていくと Ne3s 状態が飽和していき、同時に Ne2p 状態の密度が増大していく。従って、放電電流に変調が加わり、それによって He2¹S 準安定状態の密度が変化しても、それほどレーザー光に影響が表われないものと考えられる。このことを Fig.14 を用いて図式的に考察してみる。Fig.14 に示すように放電電流 I_1 と I_2 を中

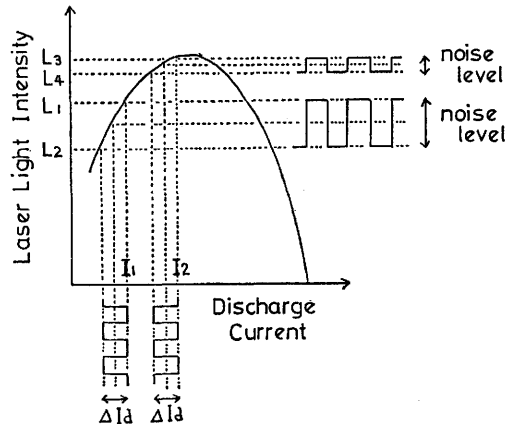


Fig.14 Discharge current dependence of modulated noise.

心に ΔId だけ変動させたとすると、放電電流 I_1 に対して ΔId の変動によって、レーザー光の強度は L_1 から L_2 まで変化する。放電電流 I_2 に対しては ΔId の変動によって、レーザー光の強度が L_3 から L_4 まで変化する。このように、放電電流が増大するにつれレーザー光の変調振幅は減少していく。ただし、この場合、レーザー光の出力強度が飽和に達するまでの放電電流の値に対して考察している。

d) 放電電流の変調度の増加に比例してレーザー光の変調振幅が大きくなっていく。これは He2¹S の準安定状態の励起密度が放電電流の変動に比例して増減していることが考えられる。放電電流の変調度を増加させていくと放電電流の変調波形にひずみが生じるために Fig.10, Fig.11 に示すように直線の傾きが変化する。

このようにして、変調雑音は約 100KHz まで存在していることが測定された。そこで、光検知器でレーザ

ー光のゆらぎを検出し、フィード・バック回路でそのゆらぎと逆位相で放電電流を変調すれば、100KHzまでのレーザー光のゆらぎならばかなりのところまで減少させられると考えられる。しかし、Fig.7より、放電電流への入力波形とレーザー光の変調波形とは高周波領域で異なってくるので、100KHz近傍のゆらぎの削除は非常に困難であると考えられる。

- e) 放電電流 6mA と 8mA のとき変調周波数 30 KHz 近傍で共振現象が表われるのは Ne3s 状態の population と Ne2p 状態の depopulation とがある周波数において一定の関係を生じて発生してくるものと思う。そのことを Fig.15 を用いて説明する。放電電流を変調すると He2'S 準安定状態が励起され Ne 原子と共鳴衝突して Ne3s 状態へエネルギーが移乗される前記により Ne3s 状態の密度は約 30 μ sec (30KHz) で最大となることを示しておいた。そこで、矩形波のパルス幅を 30 μ sec とすると変調終了後、Ne3s 状態の密度が最大となる。Ne2p 状態の緩和時間は非常に短いので変調終了と同時に Ne2p 状態の密度は最小となる。よって、Ne3s 状態と Ne2p 状態間の反転分布強度が最大となり共振現象が生じるものと考えられる。放電電流 14mA のときには共振が表われない。この理由は Fig.2 に示すようにレーザー光の出力強度は放

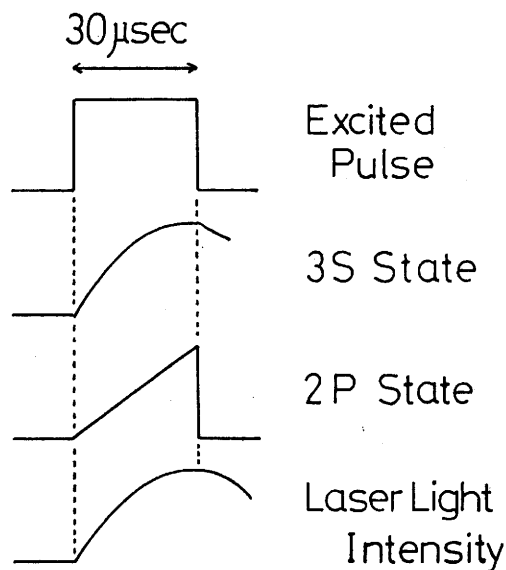


Fig.15 Operation of Ne(2p) state and Ne(3s) state under excited condition.

電電流 15mA 弱のとき最大となっている。よって放電電流 14mA のときには Ne3s 状態がほとんど飽和の傾向にあり、また Ne2p 状態の depopulation の影響を考慮しなくてもよい状態になっているためと考えられる。

- f) Fig.8 から変調周波数 40KHz を越えると変調振幅は急速に減少していく。放電電流を矩形波で変調すると Ne3s 状態へ He2'S 準安定状態から指数関数的にエネルギーを受けとる。そして、ある時間経過後、放電電流の変動分による反転分布が形成されてレーザー光の出力に変動が表われる。さらに、時間経過とともに Ne3s 励起原子の密度が増加していくことから変調振幅が増大していく。ここで、変調周波数を高くしていくと励起開始からの時間が短くなっていくことから変調振幅が減少していく。

これらのことから、He-Ne レーザーの電流変調には He2'S 準安定状態のエネルギー移乗時間がかなり影響している。

- g) Fig.8 において、放電電流 6mA のとき変調周波数 2KHz から 3KHz にかけて、放電電流 8mA のとき変調周波数 2KHz から 4KHz にかけての変調振幅の若干の上昇はモードに関係したものであらうと考えられる⁶⁾。

4.3 He-Ne レーザーの発振機構

4.2 で発振機構も含めて変調雑音について考察を行ってきた。ここでは、レーザー光と測光の変調波形の周波数依存性から発振機構について考察を進めていく。ここで、4.2 から変調雑音の臨界周波数 100KHz と与えられていることより、He2'S 準安定状態の減衰時間は約 10 μ sec である。

- a) 変調周波数 500Hz と 9KHz における小さなピークは次のように考えられる。放電電流を矩形波で変調したとき He2'S 準安定状態の密度が急激に増加する。その反面、Ne1s 状態から Ne2p 状態への励起が緩慢であるため、Ne3s 状態と Ne2p 状態間の反転分布強度が一時的に強まったものと考えられる。
- b) レーザー光の変調波形に表われている約 30 μ sec の過渡的状态は He2'S 準安定状態から Ne3s 状態へのエネルギー移乗によって Ne3s 励起原子の構成されていく時間変化に原因している。
- c) 変調終了後もレーザー光の変調波形が残存している。これは He2'S 準安定状態の緩和時間が長いため励起が切れてもなおかつ Ne3s 状態へエネルギー

ーが移乗し続ける。また、Ne2p 状態の密度が最小となるため放電電流の変動の影響が Ne3s 状態と Ne2p 状態間に残存するためと考えられる。

- d) 変調周波数 20KHz, 30KHz におけるレーザー光の変調波形はレーザー光の出力に変動が表われたときの Ne3s 励起原子の密度を Nth とし、任意の時間における Ne3s 励起原子の密度を N とすると (N-Nth) に対応していると考えられる。
- e) レーザー光と測光の変調波形の相似性の原因は測光の最も強い放出光である 赤色光 (5852Å) がレーザー発振の上準位と共通であるため同じ変調を受けるものと考えられる。
- f) レーザー光の変調波形に見出される高周波雑音は量子雑音と考えられ、特に Ne2p 状態の緩和時間に影響されると考えられる。

5. 結 論

放電電流のゆらぎに追従してゆらぐレーザー光の雑音の存在領域は He2'S 準安定状態の減衰時間によって決定される。測定結果から約 10μsec 状態であるから変調雑音の臨界周波数は約 100KHz となる。100Hz で放電電流を繰り返して矩形波変調をし放電電流の変調度を変化させると He2'S 準安定状態の単位時間当たりの励起密度が変調度に比例して増減するため放電電流の変調度とレーザー光の変調振幅との間には線形関係がある。さらに、放電電流を増大させると Ne3s 状態が飽和してくると同時に Ne2p 状態の密度が高くなっていくのでレーザー光の変調振幅は押えられてくる。特異な性質として Ne3s 状態の密度が変調開始後約 30μsec を経て最大となる。ここで、変調周波数 30KHz とすると変調終了後である 30μsec 後に Ne2p 状態の密度は最小となるため Ne3s 状態と Ne2p 状態間の反転分布強度が最大となる。よって、この変調周波数近傍で共振現象が表われる。

レーザー光や測光の変調波形の周波数依存性からも発振機構を考察していくことができた。放電電流を繰り返して矩形波変調することにより He2'S 準安定状態

から Ne3s 状態にエネルギーが移乗し、Ne3s 励起原子の密度がある値に達したときにレーザー光に変動が表われる。Ne3s 励起原子が飽和するとレーザー光の変調振幅も定常値を保つようになる。その過渡状態が約 30μsec となっている。さらに、励起開始と同時に He2'S 準安定状態の密度が高くなるのに対し Ne2p 状態の密度はそれほど高くない。よって、変調周波数 500Hz, 9KHz の比較的低周波のとき立ち上がりにピークが表われる。変調周波数 20KHz, 30KHz のとき過渡状態が顕著に表われるが、これは (N-Nth) に対応し、Ne3s 励起原子の時間変化を表わしている。また、レーザー変調波形にみられる高周波成分は量子雑音であると思われる⁴⁾。

謝 辞

実験装置の製作、測定にあたって協力された本講座卒業研究生の佐賀信裕、向出和彦の両君に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 本郷昭三, 久保宇市, 木下幸次郎, 犬石嘉雄
“He-Ne レーザーの動的特性と雑音”
電気学会雑誌, 90 (1970) 1408
- 2) 田幸敏治, 小林功, 植松健一, 大井みさほ
“He-Ne レーザーのパルス励起(1)”
応用物理, 34 (1965) 513
- 3) 上原信吾, 藤井陽一
“He-Ne 気体レーザーの放電電流変調と雑音”
電子通信学会論文誌, 53-B (1970) 451
- 4) 向出和彦, 北島巖, 岩沢宏
“気体レーザーの放電電流雑音の周波数特性”
応物学会, 北陸支部, B-10, 昭和49年12月
- 5) 鈴木健夫
“気体レーザーの放電雑音”
応用物理, 39 (1970) 263
- 6) 山岸万千雄, 佐賀信裕, 岡井善四郎, 北島巖
“He-Ne レーザーの電流変調特性”
応物学会, 北陸支部, B-11, 昭和49年12月